

EL PREMIO NOBEL DE FÍSICA 1956



The Nobel Prize in Physics 1956

William B. Shockley, John Bardeen, Walter H. Brattain

The Nobel Prize in Physics 1956



William Bradford
Shockley



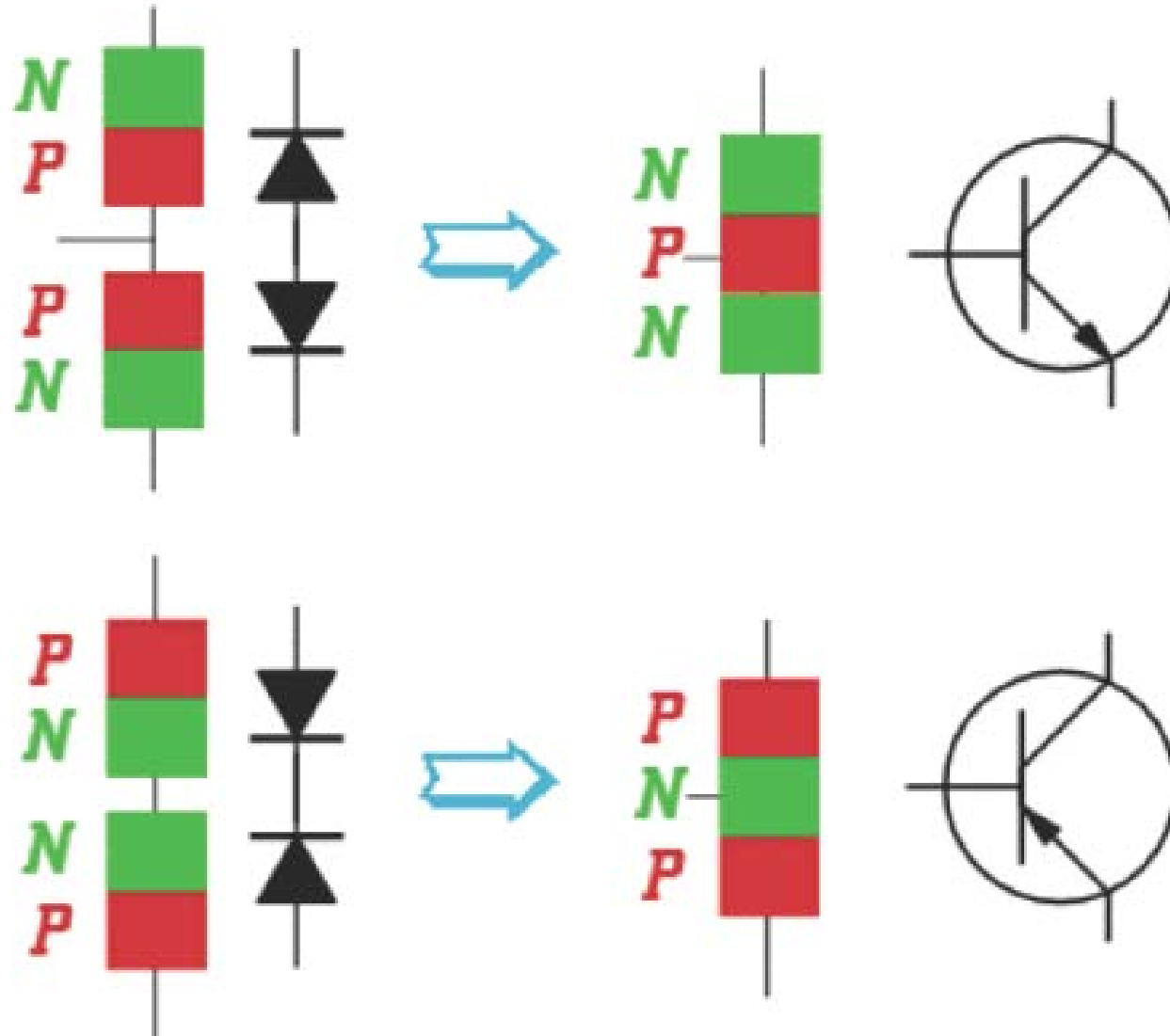
John Bardeen



Walter Houser
Brattain

The Nobel Prize in Physics 1956 was awarded jointly to William Bradford Shockley, John Bardeen and Walter Houser Brattain *"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"*.

EL TRANSISTOR BIPOLAR



EL TRANSISTOR BIPOLAR

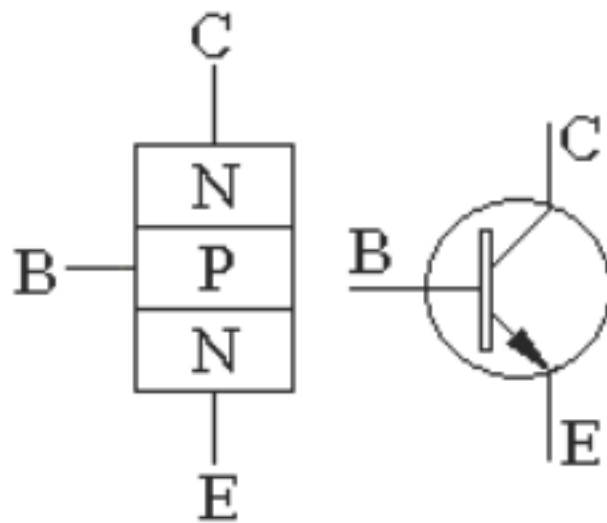
El transistor bipolar (BJT Bipolar Junction Transistor) fue desarrollado en los Laboratorios Bell Telephone en 1948. El nombre Bipolar viene de que en los procesos de conducción intervienen tanto huecos como electrones. Su invención marcó la era de todo el desarrollo tecnológico e informático que tenemos hoy día.

Durante tres décadas fue el dispositivo utilizado en todos los diseños de circuitos discretos o integrados. En los 70 y 80 apareció un competidor muy fuerte: El transistor de Juntura, que dio origen a otros componentes, los MOSFETs. Actualmente la tecnología CMOS es la más utilizada en los diseños de circuitos integrados. Pero el BJT se sigue usando en aplicaciones específicas, entre ellas circuitos de muy alta frecuencia.

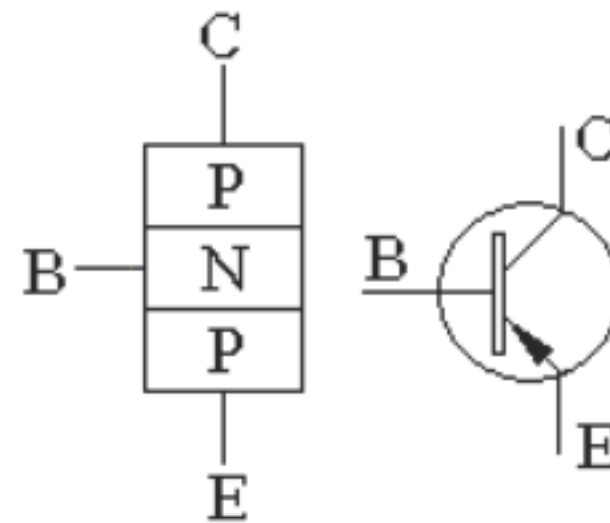
Uno de los dispositivos más utilizados en los sistemas de electrónica de potencia es el IGBT, que combina las características de entrada de un MOSFET con las de salida de un BJT.

ESTRUCTURA FÍSICA

Los transistores bipolares están constituidos por dos junturas pn espalda contra espalda.



NPN Transistor



PNP Transistor

MODOS DE OPERACIÓN

Los transistores tienen dos junturas pn: La Emisor-Base (EB) y la Colector-Base (CB). Según la polarización de las junturas, presentan cuatro modos de operación.

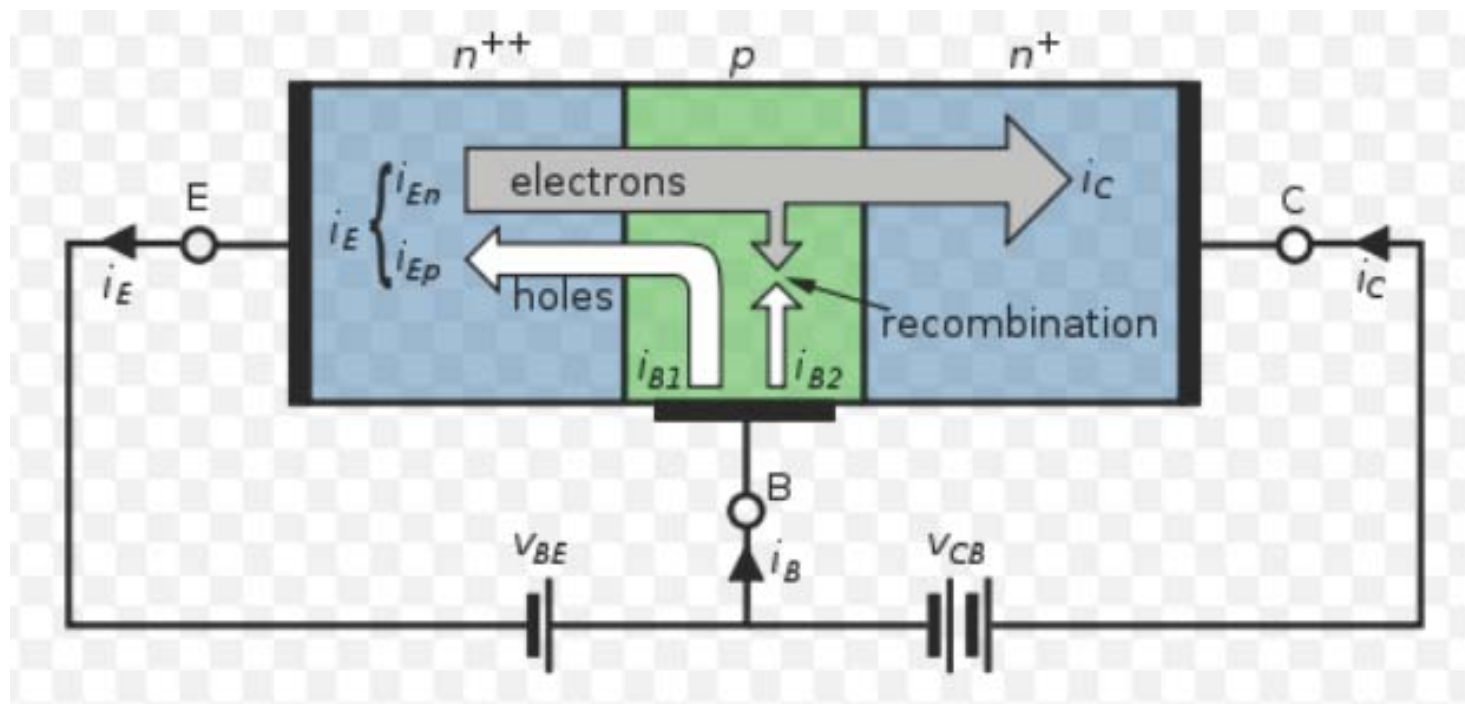
MODOS	Juntura EB	Juntura CB
Cortado	Reversa	Reversa
Activo	Directa	Reversa
Saturado	Directa	Directa
Activo inverso	Reversa	Directa

En el modo activo el transistor opera como amplificador.

Los modos Cortado y Saturado se usan en las aplicaciones donde los dispositivos tienen que conmutar entre dos estados (circuitos lógicos)

El modo activo inverso tiene aplicaciones muy limitadas.

OPERACIÓN DEL TRANSISTOR NPN EN EL MODO ACTIVO



*Se tienen que polarizar las junturas como indican las baterías. La fuente V_{BE} polariza en directo la juntura Emisor-Base. La fuente V_{CB} polariza en inverso la juntura Colector -Base.

*En el análisis se van a considerar solamente las corrientes de difusión. El emisor está mucho mas dopado que la base y mas dopado que el colector.

*La corriente de Emisor a Base tiene dos componentes: Un flujo de electrones de E a B y un flujo de huecos de menor magnitud de B a E.

*La corriente i_E tiene dirección positiva saliendo del Emisor

*En la base los electrones se convierten en portadores minoritarios y algunos se recombinan mientras que otros son arrastrados hacia el Colector.

*La corriente de Base alimenta el flujo de huecos que va de la Base al Emisor y los portadores que intervienen en la recombinación en la base. Es por lo tanto un movimiento de huecos.

*La corriente i_B tiene dirección positiva entrando en la Base.

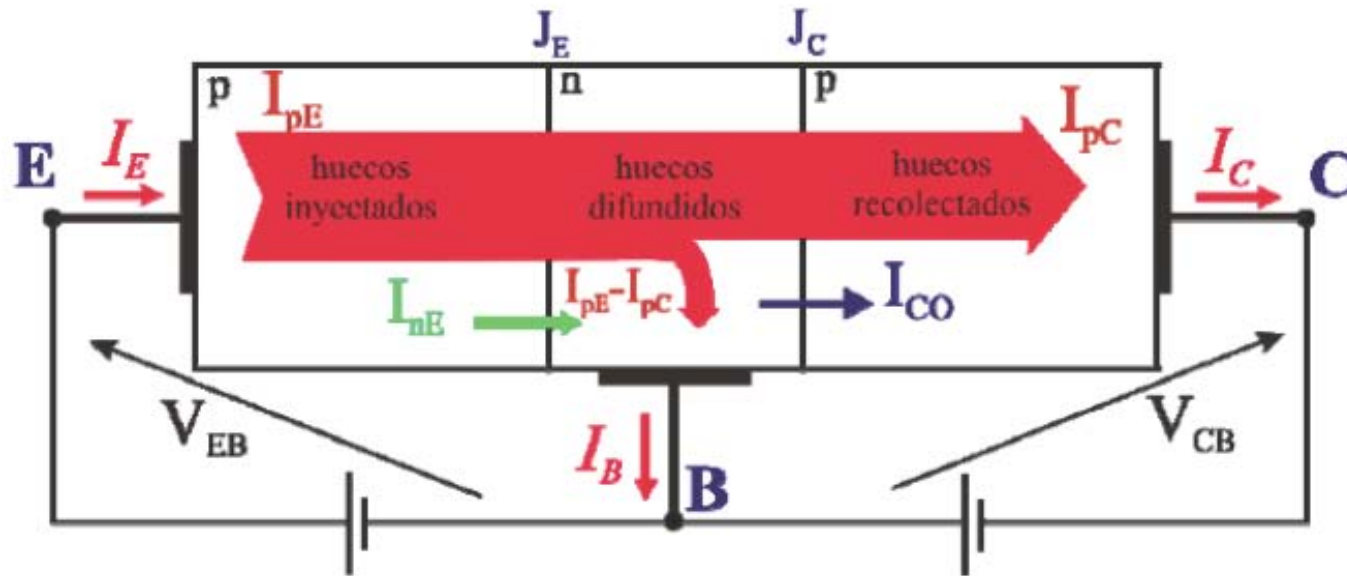
*La corriente de Colector está formada por los electrones que pasaron la juntura Colector-Base.

*La corriente i_C tiene dirección positiva entrando en el Colector.

*De acuerdo con las Leyes de Kirchhoff:

$$i_E = i_C + i_B$$

OPERACIÓN DEL TRANSISTOR PNP EN EL MODO ACTIVO



En ambos tipos de transistores la corriente de Colector es independiente del voltaje V_{CB} . Esta corriente es una fracción de la corriente de Emisor, que está controlada por el voltaje V_{EB} .

El colector se comporta como una fuente de corriente controlada por voltaje.

PARÁMETROS BÁSICOS DEL TRANSISTOR BJT

Como la juntura EB está polarizada en directo, la corriente I_E está dada por la ecuación del diodo

n=1 para transistores

$$i_E = I_{ES} \left(e^{v_{BE}/V_T} - 1 \right) \quad i_E = I_{ES} e^{v_{BE}/V_T}$$

Al Colector llega prácticamente toda la corriente del Emisor. Se relacionan mediante un parámetro denominado α .

α : Ganancia de corriente de Base Común.

La corriente de Base es aproximadamente 1% la corriente de Emisor.

Del análisis matemático se puede concluir que la corriente de Base y la de Colector están relacionadas por un parámetro identificado como β .

β : Ganancia de corriente de Emisor Común

Los parámetros α y β dependen de las características de los dispositivos

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} \quad i_C = \beta i_B \quad \alpha = \frac{i_C}{i_E} \quad i_C = \alpha i_E$$

RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DEL BJT

Los valores de α y β dependen de las características del dispositivo.

Valores típicos para β : 100, 200, 400

En todo transistor $i_E = i_C + i_B$ $i_E = i_C + \frac{i_C}{\beta} = \frac{\beta + 1}{\beta} i_C$

$$i_C = \frac{\beta}{\beta + 1} i_E = \alpha i_E \quad \alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Para $\beta = 100$ $\alpha = 0,99$.

Pequeñas variaciones en α producen grandes cambios en β .

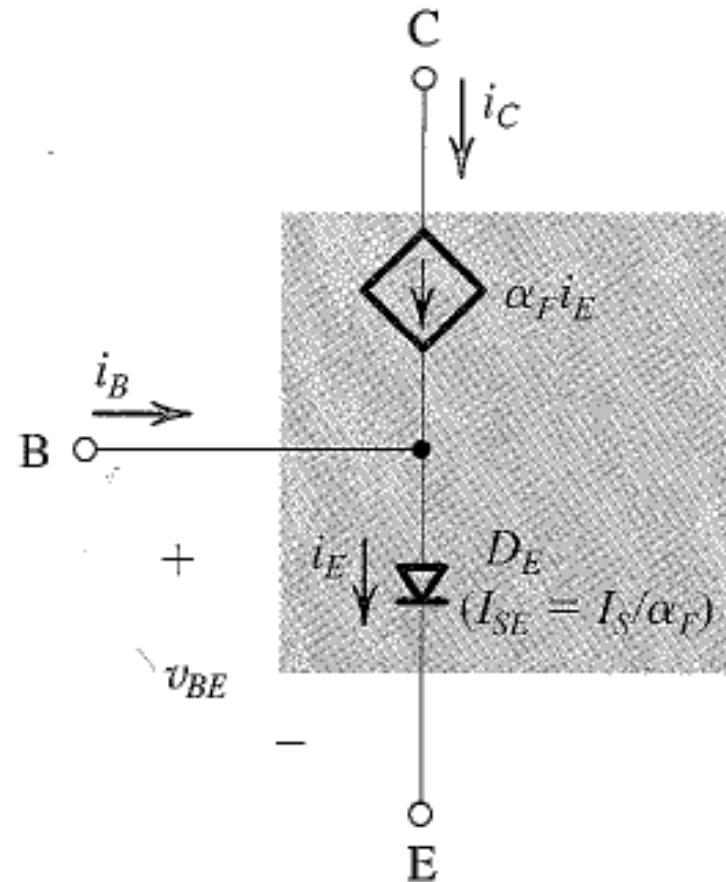
MODELO EQUIVALENTE DE GRAN SEÑAL EN LA REGIÓN ACTIVA BASE COMÚN

Con este modelo el transistor se va a usar como una red de dos puertos, con el puerto de entrada entre B y E y el puerto de salida entre C y B. De ahí que:

α : Ganancia de corriente de Base Común

La corriente por el Colector también puede expresarse como

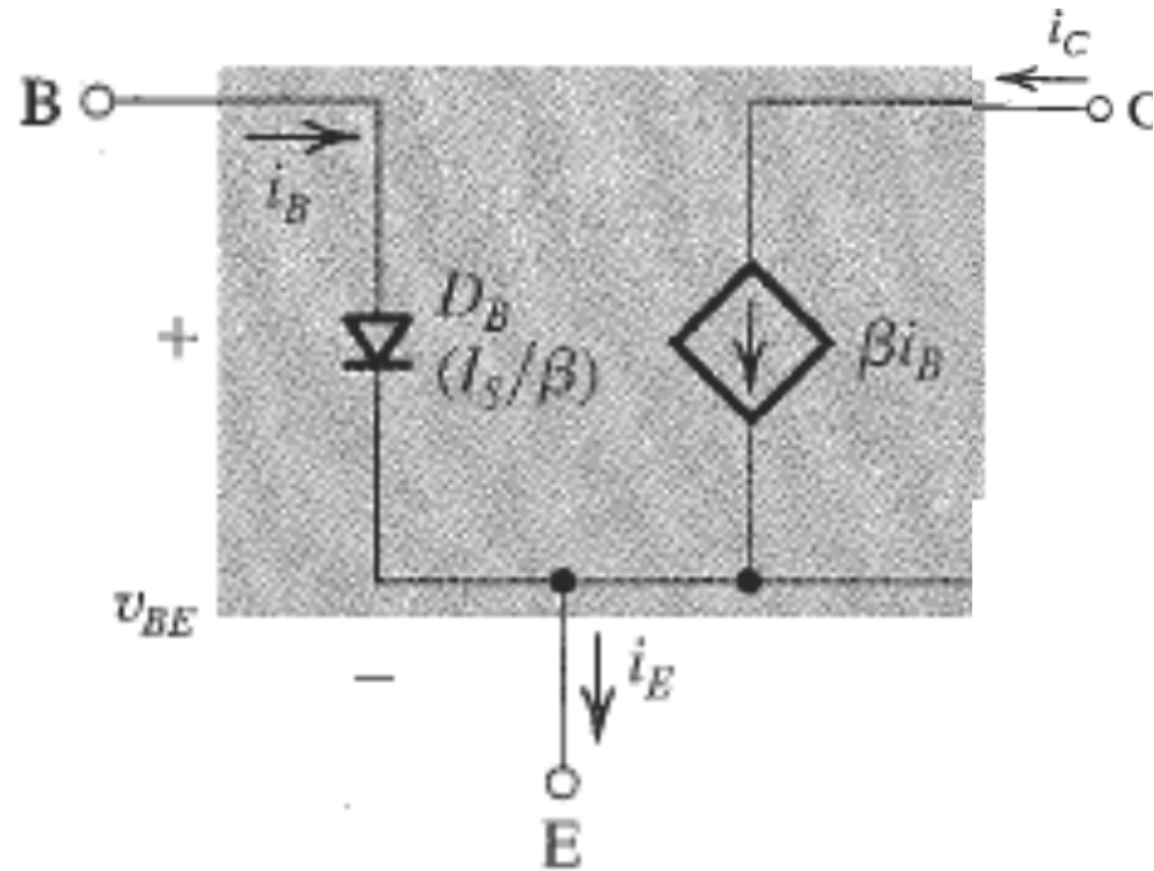
$$i_C = I_S e^{v_{BE} / V_T}$$



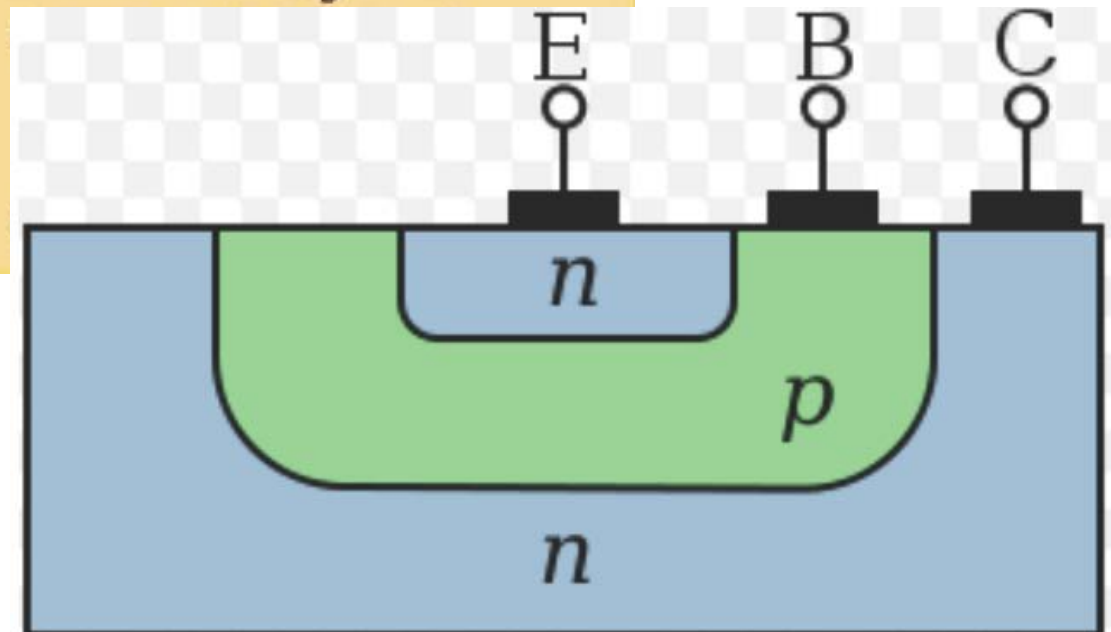
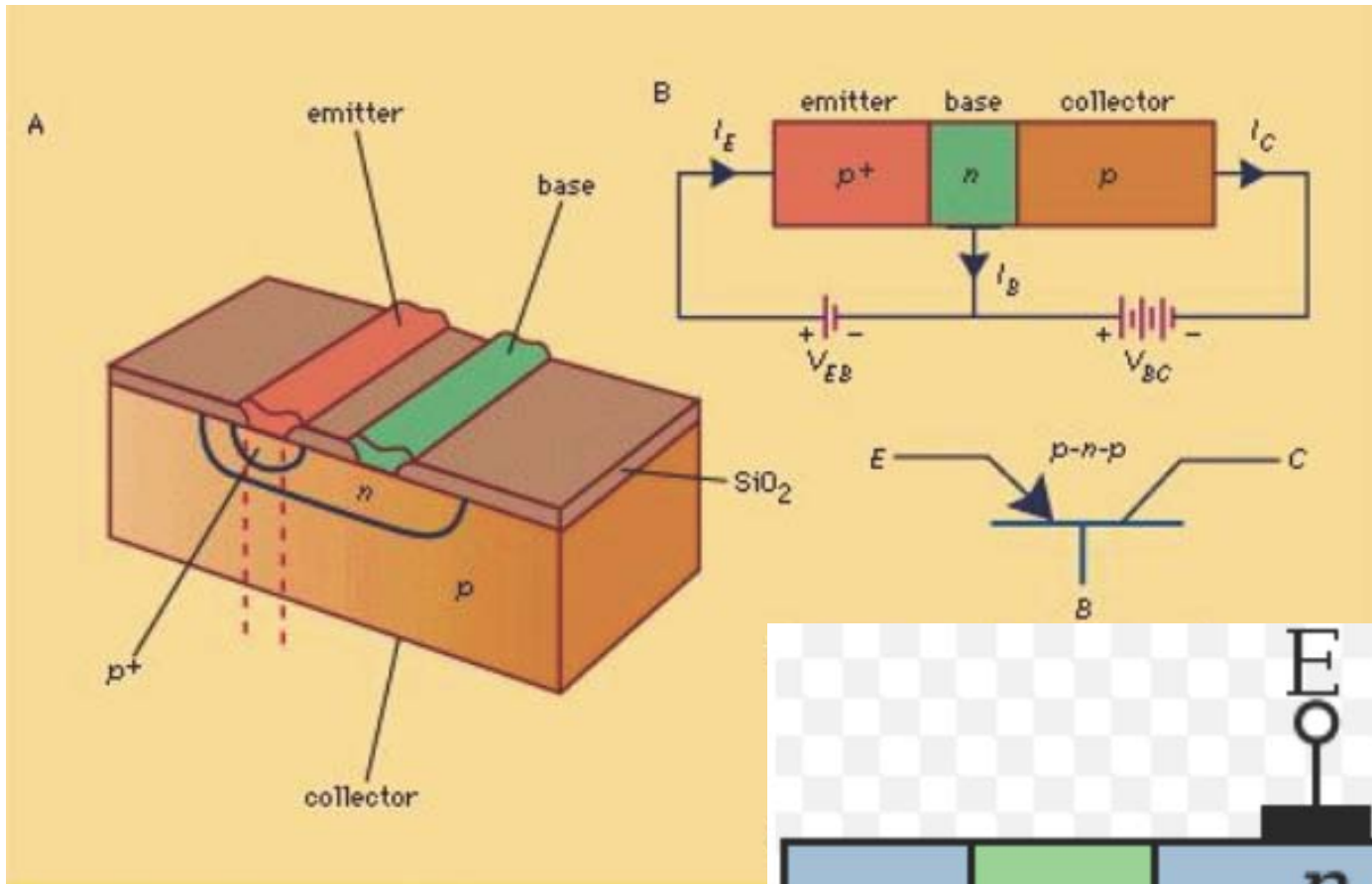
MODELO EQUIVALENTE DE GRAN SEÑAL EN LA REGIÓN ACTIVA EMISOR COMÚN

Con este modelo el transistor se va a usar como una red de dos puertos, con el puerto de entrada entre B y E y el puerto de salida entre C y E. De ahí que:

β : **Ganancia de corriente de Emisor Común**



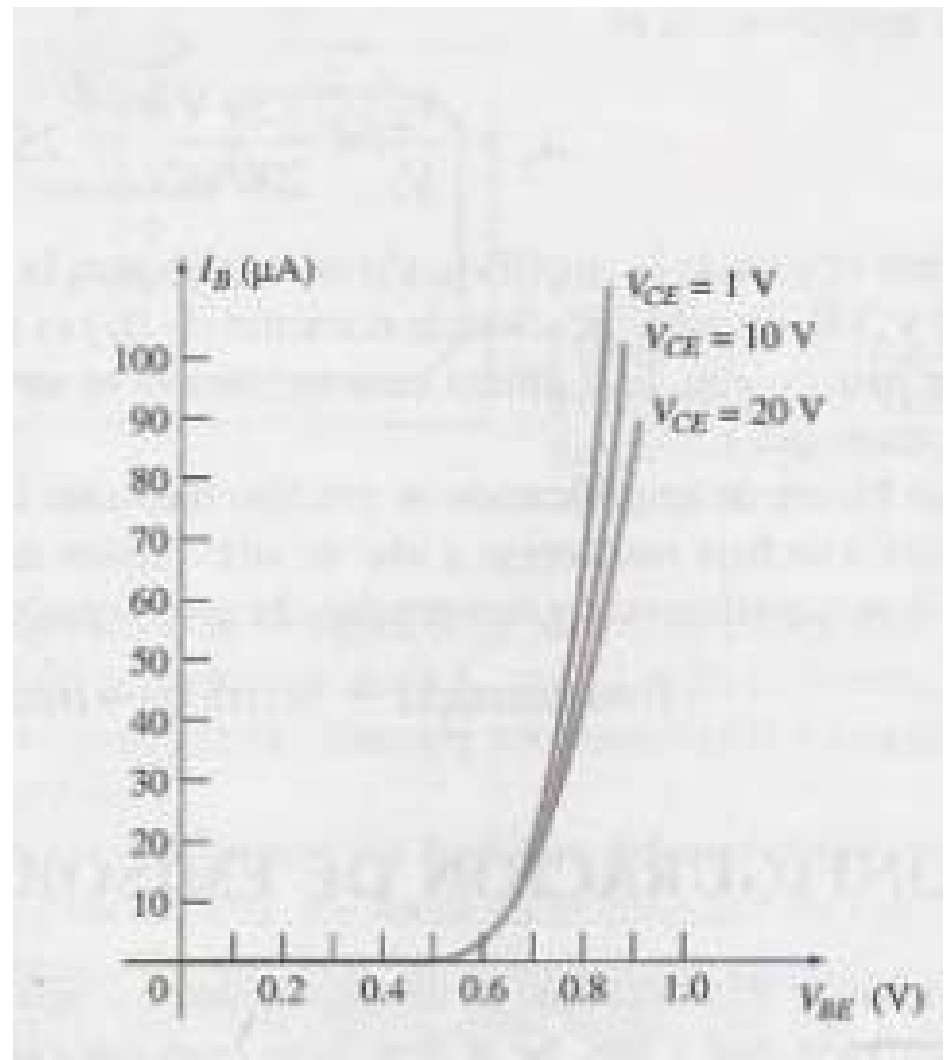
ESTRUCTURA FÍSICA DE LOS BJT



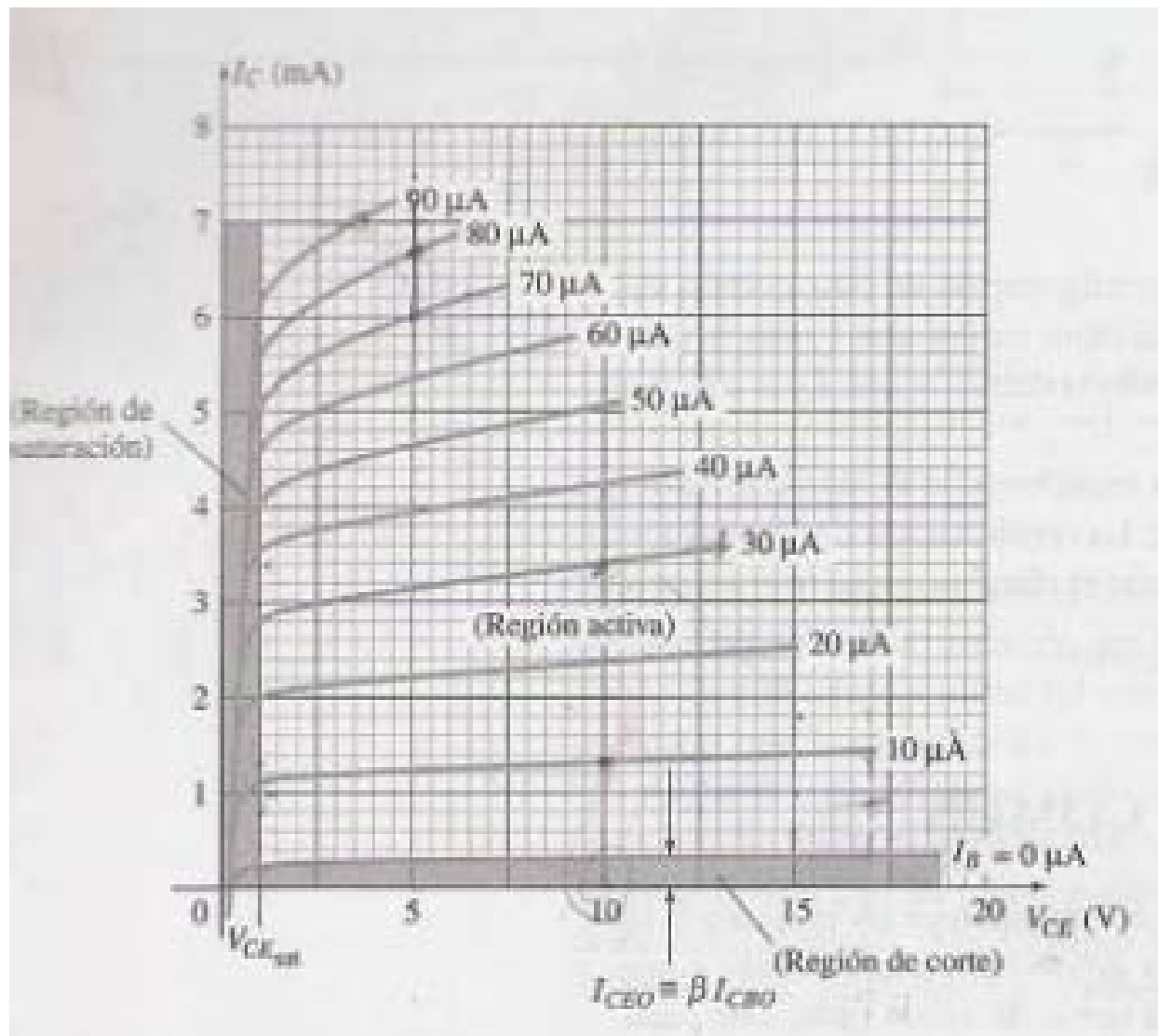
CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN BJT TIPO NPN CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA BASE-EMISOR

En estas características se observa el efecto que tiene el aumento del voltaje V_{CE} .

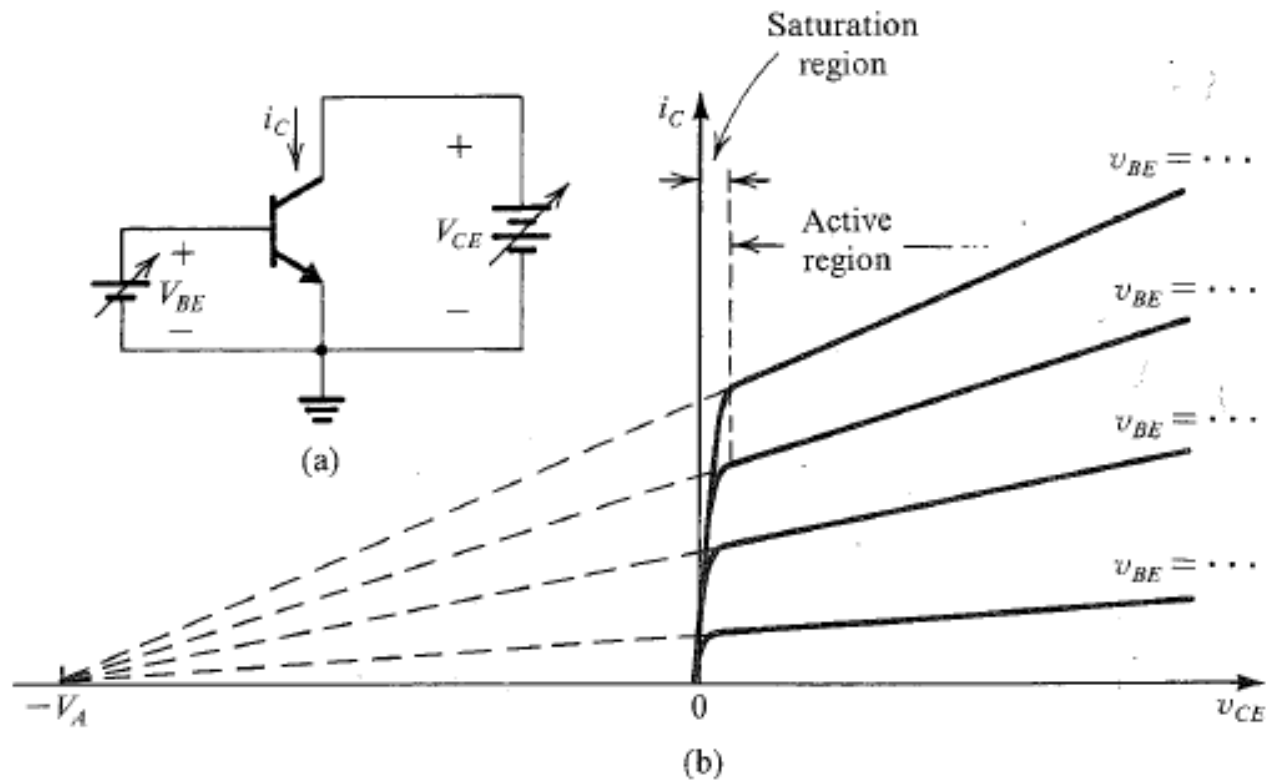
Cuando V_{CE} aumenta, crece la zona de carga espacial de la juntura BC polarizada en inverso. La base se reduce



CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN BJT TIPO NPN CARACTERÍSTICAS DE SALIDA EMISOR COMÚN



DEPENDENCIA DE i_C CON EL VOLTAJE DE COLECTOR: EL EFECTO EARLY



EL EFECTO EARLY

Las curvas características para cada valor de voltaje Base-Emisor o cada valor de corriente de Base no son planas.

Extrapolando todas las curvas correspondientes a la región activa hacia los valores negativos de V_{CE} se obtiene que todas ellas intersectan el mismo voltaje $-V_A$, denominado voltaje de Early.

La pendiente de estas curvas, $1/r_o$, está dada por la relación:

$$r_o = \left(\left. \frac{\delta i_C}{\delta v_{CE}} \right|_{V_{BE} = \text{constante}} \right)^{-1} = \frac{V_A}{I_C}$$

La resistencia r_o , no afecta la polarización de los transistores, pero sí los cálculos de ganancia cuando los BJT actúan como amplificadores.

REGIÓN DE SATURACIÓN

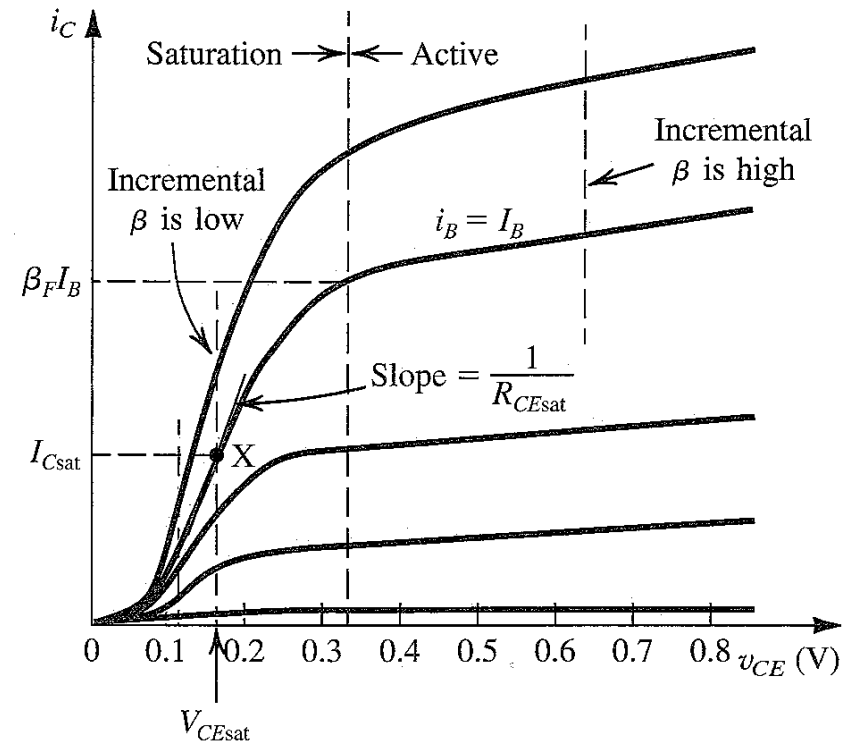
*El transistor entra en la región de saturación cuando se cumple que

$$I_{Csat} < \beta I_B$$

*El valor de I_{Csat} está dado por los valores de los componentes del circuito: Máxima corriente que puede circular por el transistor.

*Las curvas características caen hacia cero con una pendiente mucho mayor que la que tienen en la región activa.

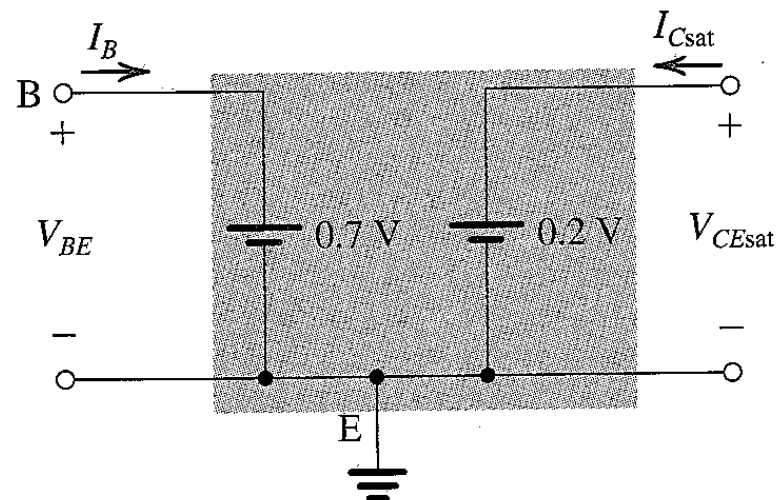
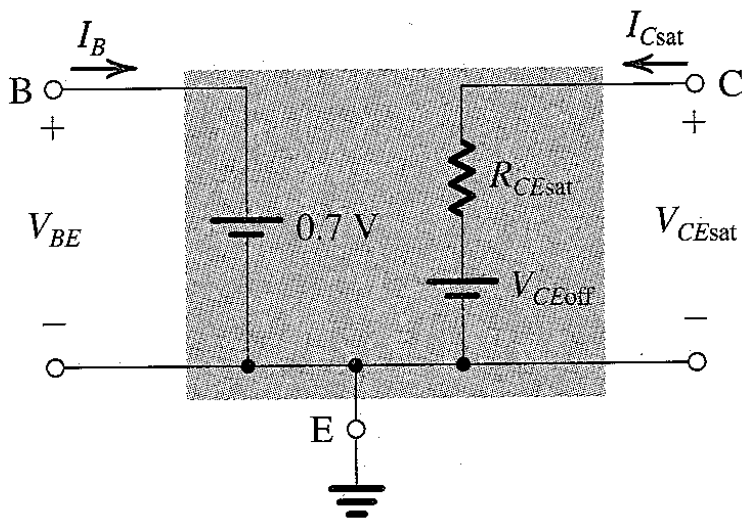
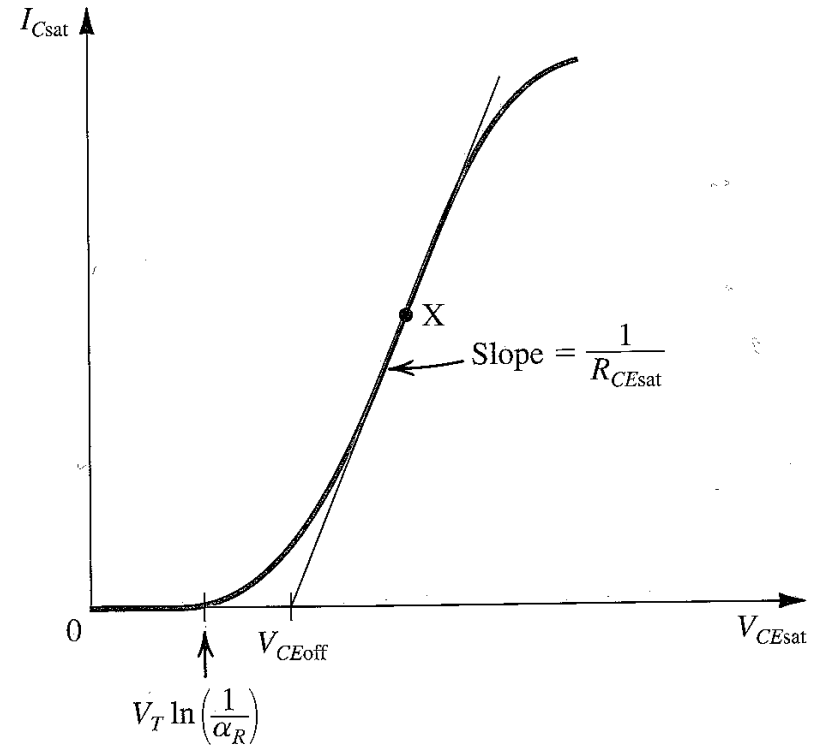
*En el punto X la corriente es I_{Csat} y el valor de I_{Csat} está en el orden de 0,1 a 0,3 V para el ejemplo.



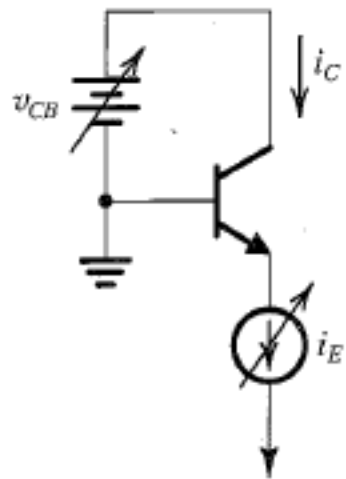
MODELO DEL TRANSISTOR EN LA REGIÓN DE SATURACIÓN

Las curvas características en la región de saturación tienen una pendiente pronunciada.

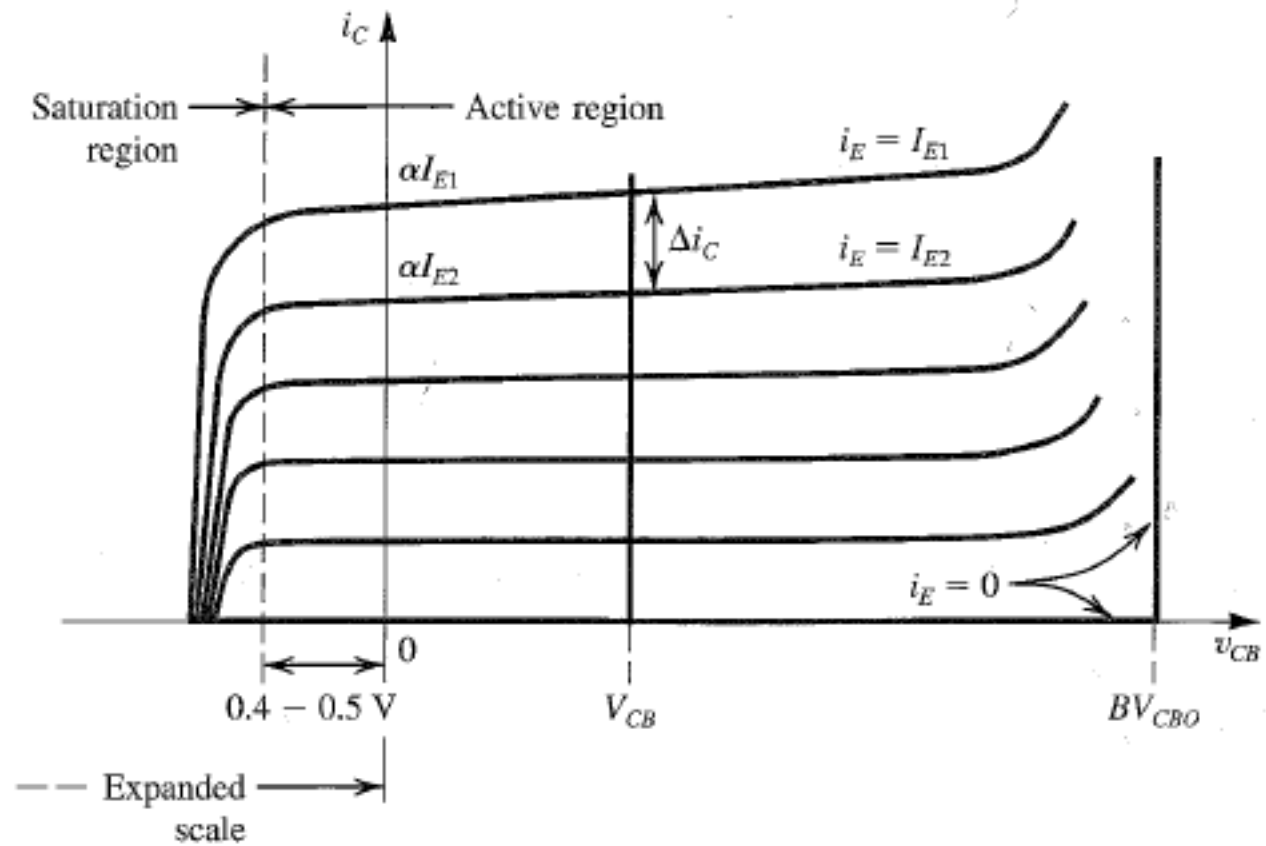
$$R_{CEsat} \equiv \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{\substack{i_B = I_B \\ i_C = I_{Csat}}}$$



OTROS CONJUNTOS DE CURVAS CARACTERÍSTICAS

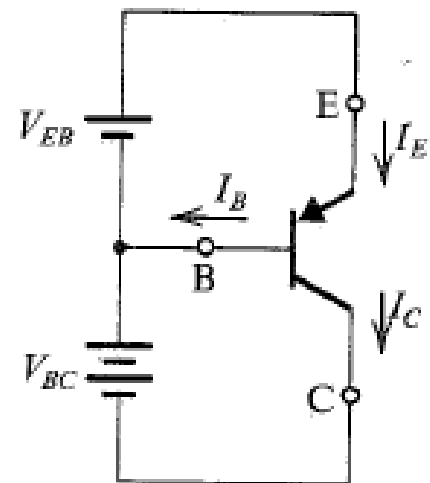
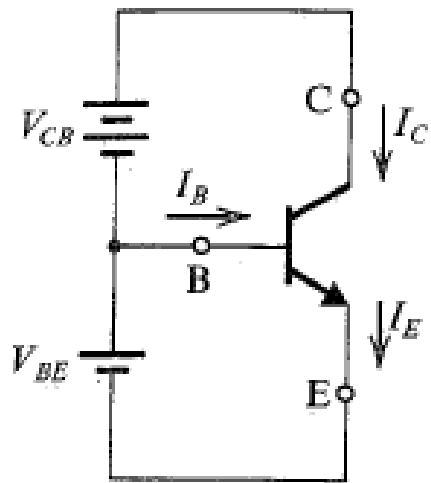
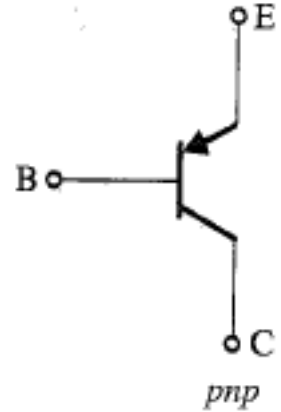
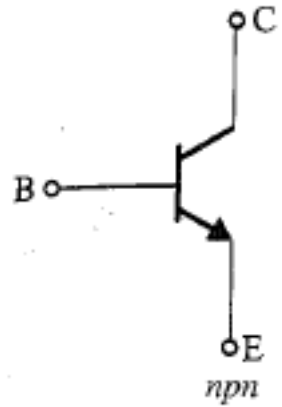


(a)



(b)

POLARIDADES DE LOS VOLTAJES Y LAS CORRIENTES EN BJTS POLARIZADOS EN LA REGIÓN ACTIVA



POLARIZACIÓN BÁSICA DE TRANSISTORES: ACTIVO

$$V_{BE} = 0,7V$$

$$\beta = 100$$

Suponemos que está en la región activa

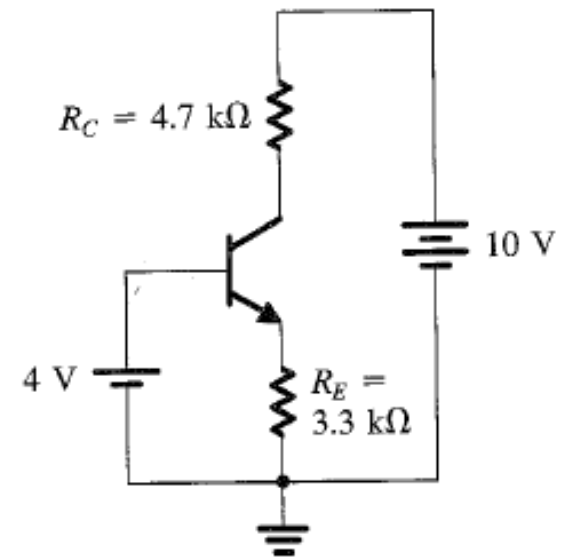
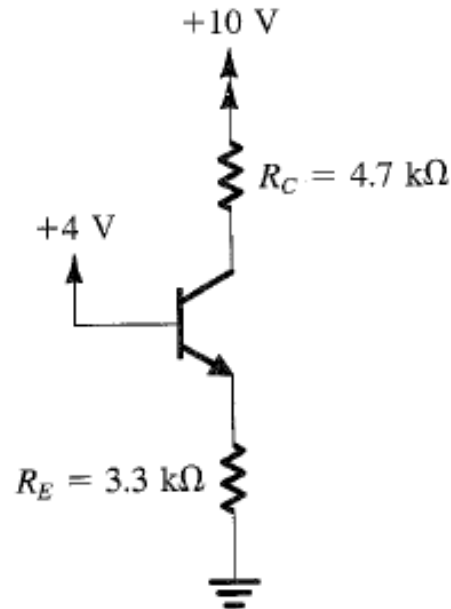
$$V_{BE} = V_B - V_E = 0,7V$$

$$V_E = 4V - 0,7V = 3,3V$$

$$I_E = \frac{3,3V}{3,3k\Omega} = 1mA$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{100}{100 + 1} = 0,99 \quad I_C = \alpha I_E = 0,99 \times 1mA = 0,99mA \quad I_B = \frac{I_C}{\beta} = 0,01mA$$

$$V_C = 10V - 4,7k\Omega \times 0,99mA = 5,34V \quad V_{CB} = 5,34V - 4V = 1,34V$$



Juntura CB polarizada en inverso, por lo tanto está activo.